

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
8. Februar 2001 (08.02.2001)

PCT

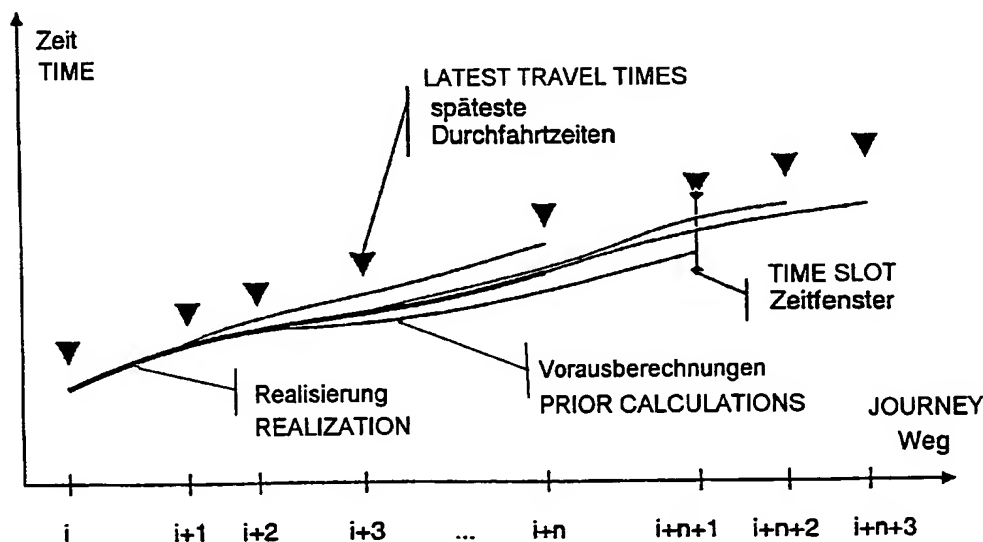
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 01/08955 A1**

- (51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **B61L 3/00** (72) Erfinder; und  
(21) Internationales Aktenzeichen: **PCT/EP00/07147** (75) Erfinder/Anmelder (*nur für US*): **FRANKE, Rüdiger**  
(22) Internationales Anmeldedatum: 26. Juli 2000 (26.07.2000) [DE/DE]; Fritz-Frey-Strasse 2, D-69121 Heidelberg  
(25) Einreichungssprache: Deutsch (DE). **TERWIESCH, Peter** [CH/CH]; Gartenweg 459,  
(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch CH-5512 Wohlenschwil (CH). **MEYER, Markus**  
(30) Angaben zur Priorität: 199 35 349.2 29. Juli 1999 (29.07.1999) DE [CH/CH]; Höchweidstrasse 7, CH-6030 Ebikon (CH).  
(71) Anmelder (*für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von* **KLOSE, Christian** [DE/DE]; Starweg 28, D-14774 Brand-  
US): **DAIMLERCHRYSLER AG** [DE/DE]; Epplestrasse 225, D-70546 Stuttgart (DE). **KETTELER, Karl-Hermann**  
(74) Anwälte: **RUPPRECHT, Klaus** usw.; John-F.-Kennedy-  
(81) Bestimmungsstaaten (*national*): AE, AG, AL, AM, AT, Strasse 4, D-65189 Wiesbaden (DE).  
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CR, CU,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR OPTIMIZING ENERGY IN THE MANNER IN WHICH A VEHICLE OR TRAIN IS DRIVEN USING KINETIC ENERGY

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR ENERGIEOPTIMIERUNG DER FAHRWEISE BEI EINEM FAHRZEUG/ZUG UNTER VERWENDUNG DER KINETISCHEN ENERGIE



(57) Abstract: Disclosed is a method which enables energy to be optimized in a motor vehicle or a train, using spare time slots in a timetable. According to the inventive method, the overall route between a point of departure when stopped and a stopping point upon arrival is subdivided into several stages. The kinetic energy of the vehicle and time are used as state variables in a vehicle model in order to obtain an energy-saving method of travel, using an optimizing algorithm. Changes in the state variables in relation to the journey are taken into account at each stage.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 01/08955 A1



CZ, DE, DK, DM, DZ, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZW.

**Veröffentlicht:**

- *Mit internationalem Recherchenbericht.*
- *Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen.*

(84) **Bestimmungsstaaten (regional):** ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes, und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

---

(57) **Zusammenfassung:** Es wird ein Verfahren zur Energieoptimierung bei einem Fahrzeug/Zug bei der Benutzung von Zeitreserven vorgeschlagen, welche bei einem Fahrplan eingeplant sind, wobei eine zwischen einem Start-Haltepunkt und einem Ziel-Haltepunkt zu durchzufahrende Gesamtstrecke in mehrere Stufen unterteilt wird. Zur Erzielung einer energiesparenden Fahrweise unter Zuhilfenahme eines Optimierungsalgorithmus werden die kinetische Energie des Fahrzeuges und die Zeit als Zustandsgrößen in einem Fahrzeugmodell verwendet. Die Änderungen der Zustandsgrößen werden bezüglich des Weges in jeder Stufe betrachtet.

## Verfahren zur Energieoptimierung der Fahrweise bei einem Fahrzeug/Zug unter Verwendung der kinetischen Energie

### Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Energieoptimierung der Fahrweise bei einem Fahrzeug/Zug gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Bei der Erstellung von Fahrplänen für den Schienenverkehr werden Zeitreserven für unvorhergesehene Ereignisse und widrige Betriebsbedingungen eingeplant. Da während realer Fahrten die Betriebsbedingungen typischerweise günstiger sind als in der Planung angenommen, werden die dabei entstehenden Zeitreserven für andere Zwecke verfügbar. Eine besonders sinnvolle Benutzung der Zeitreserven besteht in der Einsparung von Energie mittels geeigneter Fahrweise des Fahrzeuges/Zuges.

Aus der DE 30 26 652 A1, der DD 255 132 A1 und der EP 0 467 377 B1 sind in diesem Zusammenhang Verfahren bekannt, wie man ein Fahrzeug energieoptimal zwischen zwei Haltepunkten bewegt. Bei langen Strecken wird eine Unterteilung in mehrere Abschnitte vorgeschlagen, wobei in jedem Abschnitt eine optimale Teillösung ermittelt wird und die Gesamtlösung sich aus der Zusammensetzung der Teillösungen ergibt.

Die DE 30 26 652 A1 und die EP 0 467 377 B1 beschäftigen sich mit einer Systemstruktur, in der Verfahren zur Energieminimierung realisiert werden können, wobei eine Gesamtstrecke zwischen zwei Haltepunkten (Haltebahnhöfen) berücksichtigt wird.

Die bisher bekannten Verfahren basieren auf einem Fahrzeugmodell, das die Geschwindigkeit des Fahrzeuges als wesentliche Variable enthält. Modelle zur Beschreibung der Geschwindigkeitsänderung über dem Weg sind jedoch in nachteiliger Weise stark nichtlinear. Die Anwendung eines iterativ arbeitenden numerischen Algorithmus zur Lösung der impliziten nichtlinearen Gleichungen ist

insbesondere in Echtzeitanwendung kritisch. Es ist keine explizite analytische Lösung bekannt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Verfahren zur Energieoptimierung der Fahrweise bei einem Fahrzeug/Zug mit in mehrere Abschnitte unterteilter Gesamtstrecke anzugeben.

Diese Aufgabe wird in Verbindung mit dem Oberbegriff durch die im den Anspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst.

Die mit der Erfindung erzielbaren Vorteile bestehen insbesondere darin, daß durch Heranziehen der Bewegungsgleichung für die kinetische Energie des Fahrzeuges beim Fahrzeugmodell die Optimierungsrechnung vereinfacht wird. Die Verwendung einer expliziten analytischen Lösung der Bewegungsgleichung für die kinetische Energie des Fahrzeuges erlaubt eine Vorabbestimmung des nötigen Rechenaufwandes, was insbesondere für die Anwendung unter Echtzeitbedingungen wichtig ist.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

Weitere Vorteile des vorgeschlagenen Verfahrens ergeben sich aus der nachstehenden Beschreibung.

Die Erfindung wird nachstehend näher erläutert.

Das wesentliche der Erfindung ist darin zu sehen, daß zur Berechnung der optimalen Fahrweise beim Fahrzeugmodell bzw. Differentialgleichungs-Modell an Stelle der Geschwindigkeit des Fahrzeuges die Bewegungsgleichung für die kinetische Energie des Fahrzeuges betrachtet wird, d. h. es werden die kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  des Fahrzeuges und die Zeit  $t$  als Zustandsgrößen verwendet. Hierdurch ist die analytische Lösung der Bewegungsgleichung möglich, womit das Optimierungsverfahren beträchtlich vereinfacht wird.

Es werden die Änderungen der Zustandsgrößen bezüglich des Weges  $s$  betrachtet. Das Differentialgleichungs-Modell hat die Form:

$$\frac{de_{kin}}{ds} = A - B\sqrt{e_{kin}} - C \cdot e_{kin}, \quad e_{kin}(0) = e_0,$$

$$\frac{dt}{ds} = D\sqrt{\frac{1}{e_{kin}}}, \quad t(0) = t_0, \text{ mit } D = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Der Term A beinhaltet die vom Antriebssystem aufgebrachte Traktionskraft (Beschleunigung und Bremsung), den Streckenwiderstand und konstante Anteile des Fahrwiderstandes. Der Terme B und C beschreiben geschwindigkeitsabhängige Teile des Fahrwiderstandes, insbesondere beschreibt C den Luftwiderstand und B den Laufwerksbeiwert für Störbewegungen. Die Variable  $e_{kin}$  beschreibt die auf die Fahrzeugmasse  $m$  (Zugmasse) normierte spezifische kinetische Energie des Fahrzeuges/Zuges:

$$e_{kin} = \frac{1}{m \cdot \rho} E_{kin} = \frac{1}{2} v^2,$$

wobei  $\rho$  ein Zuschlagfaktor für rotierende Massen und  $v$  die Geschwindigkeit des Fahrzeuges sind.

Für die Optimierung wird die betrachtete Strecke in mehrere Stufen zerlegt, so daß in jeder Stufe die Maximalgeschwindigkeit und die Terme A und C konstant angenommen werden können. Der Term B wird approximativ mit in die Terme C und A einbezogen, so daß  $B=0$  gilt. Für jede Stufe wird nun folgende analytische Lösung der angegebenen Differentialgleichungen zur Berechnung der Änderung der kinetischen Energie und des Zeitverbrauchs  $\Delta t$  verwendet:

$$e_{kin}(s) = \frac{A}{C} + \left( e_{kin}(0) - \frac{A}{C} \right) \cdot \exp(-C \cdot s),$$

$$t(s) = t(0) + \Delta t(s), \text{ wobei}$$

für  $A > 0$  und  $C / A \cdot e_{kin}(0) = 1$  (konstante Geschwindigkeit) gilt:

$$\Delta t(s) = \frac{D \cdot s}{\sqrt{e_{kin}(0)}},$$

für  $A > 0$  und  $C / A \cdot e_{kin}(0) \neq 1$  gilt:

$$\Delta t(s) = \frac{2D}{\sqrt{A \cdot C}} \operatorname{ar} \tanh \left( \frac{x - y}{1 - x \cdot y} \right),$$

$$x = \sqrt{1 + \left( \frac{C}{A} e_{kin}(0) - 1 \right) \exp(-C \cdot s)}, \quad y = \sqrt{\frac{C}{A} e_{kin}(0)},$$

für  $\frac{-C \cdot e_{kin}(0)}{[\exp(C \cdot s) - 1]} < A < 0$  gilt:

$$\Delta t(s) = \frac{2D}{\sqrt{-A \cdot C}} \arctan \left( \frac{y - x}{1 + x \cdot y} \right),$$

$$x = \sqrt{-\left( 1 + \left( \frac{C}{A} e_{kin}(0) - 1 \right) \exp(-C \cdot s) \right)}, \quad y = \sqrt{-\frac{C}{A} e_{kin}(0)},$$

für  $A = 0$  gilt:

$$\Delta t(s) = \frac{2D}{C \sqrt{e_{kin}(0)}} \left[ \exp \left( \frac{C}{2} s \right) - 1 \right].$$

Das Optimierungsproblem wird demnach als Mehrstufenproblem formuliert und mit einem geeigneten Optimierungsalgorithmus gelöst. Geeignete Optimierungsalgorithmen sind beispielsweise die „Dynamische Programmierung“ nach Bellman oder Überführung in und Lösung als nichtlineares Optimierungsproblem. Die Algorithmen sind z.B. aus Papageorgiou: Optimierung, Kapitel 10, 19 und insbes. 20, Oldenbourg Verlag, 1996 bekannt.

Bezugszeichenliste

- A vom Antriebssystem aufgebrachte Traktionskraft (Beschleunigung und Bremsung), Streckenwiderstand und konstante Anteile des Fahrwiderstandes
- B geschwindigkeitsabhängiger Teil des Fahrwiderstandes  
(Laufwerksbeiwert für Störbewegungen)
- C geschwindigkeitsabhängiger Teil des Fahrwiderstandes  
(Luftwiderstand)
- D  $\sqrt{2}/2$
- $E_{\text{kin}}$  kinetische Energie des Fahrzeuges/Zuges
- $e_{\text{kin}}$  auf die Fahrzeugmasse normierte spezifische kinetische Energie des Fahrzeuges/Zuges
- $e_0$  Anfangswert von  $e_{\text{kin}}$
- m Fahrzeugmasse
- s Weg
- t Zeit
- $t_0$  Anfangswert der Zeit t
- $\Delta t$  Zeitverbrauch
- v Geschwindigkeit des Fahrzeuges/Zuges
- $\rho$  Zuschlagfaktor für rotierende Massen

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Energieoptimierung bei einem Fahrzeug/Zug bei der Benutzung von Zeitreserven, welche bei einem Fahrplan eingeplant sind, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzielung einer energiesparenden Fahrweise unter Zuhilfenahme eines Optimierungsalgorithmus die kinetische Energie des Fahrzeuges und die Zeit als Zustandsgrößen in einem Fahrzeugmodell verwendet und die Änderungen der Zustandsgrößen bezüglich des Weges betrachtet werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch folgendes Differentialgleichungs-Modell zugrunde gelegt wird:

$$\frac{de_{kin}}{ds} = A - B\sqrt{e_{kin}} - C \cdot e_{kin}, \quad e_{kin}(0) = e_0,$$

$$\frac{dt}{ds} = D\sqrt{\frac{1}{e_{kin}}}, \quad t(0) = t_0, \quad \text{mit } D = \frac{\sqrt{2}}{2},$$

$$\text{wobei } e_{kin} = \frac{1}{m \cdot \rho} E_{kin} = \frac{1}{2} v^2,$$

mit

$E_{kin}$  kinetische Energie des Fahrzeuges

$e_{kin}$  auf die Fahrzeugmasse normierte spezifische kinetische Energie des Fahrzeuges/Zuges

$e_0$  Anfangswert von  $e_{kin}$

A vom Antriebssystem aufgebrachte Traktionskraft (Beschleunigung und Bremsung), Streckenwiderstand und konstante Anteile des Fahrwiderstandes

B geschwindigkeitsabhängiger Teil des Fahrwiderstandes (Laufwerksbeiwert für Störbewegungen)

C geschwindigkeitsabhängiger Teil des Fahrwiderstandes (Luftwiderstand)



m	Fahrzeugmasse
s	Weg
t	Zeit
$t_0$	Anfangswert der Zeit t
v	Geschwindigkeit des Fahrzeuges
$\rho$	Zuschlagfaktor für rotierende Massen.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß betrachtete Strecke in mehrere Stufen zerlegt wird und für jede Stufe folgende analytische Lösung verwendet wird:

$$e_{kin}(s) = \frac{A}{C} + \left( e_{kin}(0) - \frac{A}{C} \right) \cdot \exp(-C \cdot s),$$

$$t(s) = t(0) + \Delta t(s),$$

wobei für  $A > 0$  und  $C / A \cdot e_{kin}(0) = 1$  gilt:

$$\Delta t(s) = \frac{Ds}{\sqrt{e(0)}},$$

für  $A > 0$  und  $C / A \cdot e_{kin}(0) \neq 1$  gilt:

$$\Delta t(s) = \frac{2D}{\sqrt{AC}} \operatorname{ar} \tanh \left( \frac{x-y}{1-xy} \right),$$

$$x = \sqrt{1 + \left( \frac{C}{A} e_{kin}(0) - 1 \right) \exp(-Cs)}, \quad y = \sqrt{\frac{C}{A} e_{kin}(0)},$$

für  $\frac{-C \cdot e_{kin}(0)}{[\exp(C \cdot s) - 1]} < A < 0$  gilt:

$$\Delta t(s) = \frac{2D}{\sqrt{-AC}} \arctan \left( \frac{y-x}{1+xy} \right),$$

$$x = \sqrt{-\left( 1 + \left( \frac{C}{A} e_{kin}(0) - 1 \right) \exp(-Cs) \right)}, \quad y = \sqrt{-\frac{C}{A} e_{kin}(0)},$$

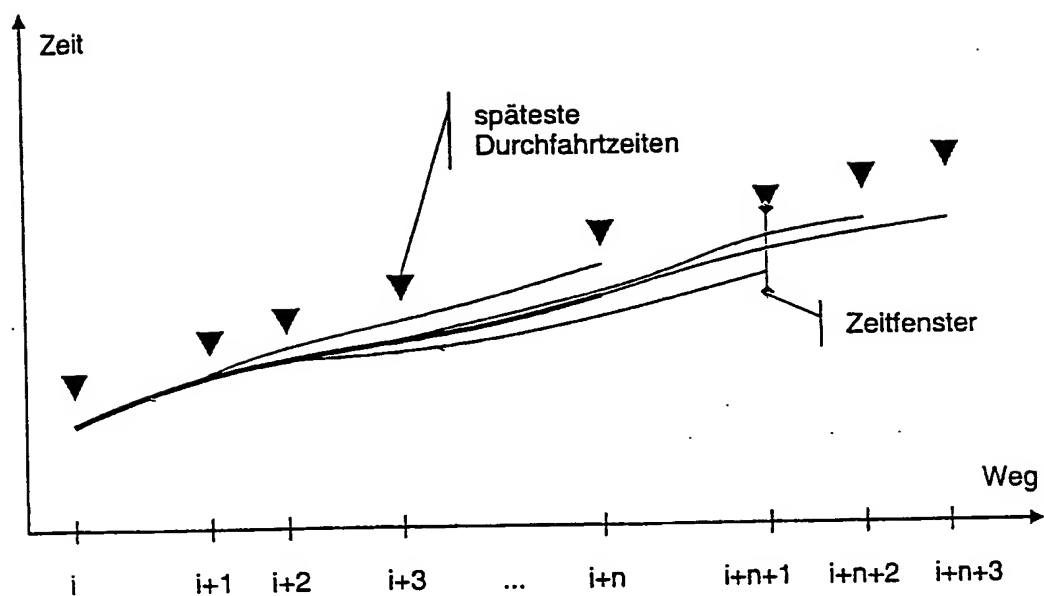
für  $A=0$  gilt:

$$\Delta t(s) = \frac{2D}{C\sqrt{e(0)}} \left[ \exp\left(\frac{C}{2}s\right) - 1 \right].$$

mit

$\Delta t$       Zeitverbrauch.

1/1



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Inter. Appl. No.

PCT/EP 00/07147

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
IPC 7 B61L3/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
IPC 7 B61L B60L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DD 208 324 A (HORN PETER;WINKLER AXEL; GROSSE SEBASTIAN) 2 May 1984 (1984-05-02) the whole document	1
A	DD 129 761 A (HORN PETER;WINKLER AXEL) 8 February 1978 (1978-02-08) the whole document	1
A	DD 262 836 A (VERKEHRSWESEN FORSCH INST) 14 December 1988 (1988-12-14) the whole document	1
A	DD 266 539 A (ZENTRALES FI DES VERKEHRS WESE) 5 April 1989 (1989-04-05) the whole document	1
	--- -/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

### \* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*G\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

12 December 2000

Date of mailing of the international search report

21/12/2000

Name and mailing address of the ISA  
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Reekmans, M

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Inter. Appl. Application No

PCT/EP 00/07147

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>DD 236 705 A (VERKEHRSWESSEN FORSCH INST)  18 June 1986 (1986-06-18)  the whole document</p>	1

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

Inter. Appl. Application No

PCT/EP 00/07147

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DD 208324	A	02-05-1984	NONE
DD 129761	A	08-02-1978	NONE
DD 262836	A	14-12-1988	NONE
DD 266539	A	05-04-1989	NONE
DD 236705	A	18-06-1986	NONE

PCT/EP 00/07147

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 00/07147

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	DD 236 705 A (VERKEHRSWESEN FORSCH INST) 18. Juni 1986 (1986-06-18) das ganze Dokument -----	1



# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 00/07147

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DD 208324	A	02-05-1984	KEINE	
DD 129761	A	08-02-1978	KEINE	
DD 262836	A	14-12-1988	KEINE	
DD 266539	A	05-04-1989	KEINE	
DD 236705	A	18-06-1986	KEINE	